

Литература

5. Баштовой, В.Г. Форма поверхности воздушной полости в магнитной жидкости, захваченной и удерживаемой магнитным полем / В.Г.Баштовой [и др.] // Известия ЮЗГУ, Серия Физика и химия. – 2012. – № 2. – С.107-112.
6. Баштовой В.Г., Берковский Б.М., Вислович А.Н. Введение в термомеханику магнитных жидкостей. – М.:ИВТАН СССР, 1985. – 188с.
7. Ryapolov, P.A. Study of the working area of a ring magnet MagLev system using a thin layer of magnetic fluid / P. A. Ryapolov, V.M. Polunin, V.G. Bashtovoi, A.G. Reks, E.A. Sokolov, E.B. Postnikov //IEEE Magnetics Letters . – August 2020. – V.11. – PP.7104305.
8. Боев, М.Л. Неустойчивость течения магнитной жидкости в процессе затопления ею воздушной полости / М.Л.Боев [и др.] // Известия высших учебных заведений, Физика. – 2014. – № 10. – С. 47-53.

УДК 538.4

Влияние перераспределения концентрации частиц в магнитной жидкости на характеристики магнитожидкостного уплотнения

Баштовой В.Г., Рекс А.Г., Погирницкая С.Г.
Белорусский национальный технический университет

Как показано в работах [1-4] перераспределение концентрации частиц в магнитной жидкости, вызванное процессами магнитофореза и броуновской диффузии, может приводить к заметному изменению удерживаемого перепада давления в магнитожидкостном уплотнении.

В настоящей работе представлены результаты теоретического рассмотрения этого вопроса на примере модели магнитожидкостного уплотнения, представленной на рисунке1.

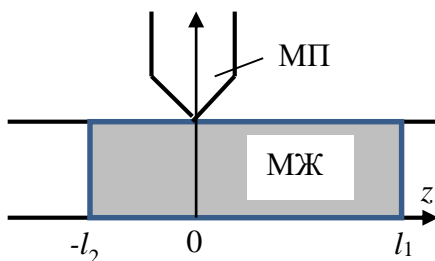


Рисунок 1. Геометрия модели магнитожидкостного уплотнения с произвольным положением объема магнитной жидкости

Объем магнитной жидкости заполняет цилиндрический зазор между вращающимся валом и корпусом, удерживается в нем неоднородным магнитным полем, создаваемым магнитными полюсами МП, занимает произвольное положение под полюсом магнита, располагаясь вдоль оси z между координатами $[-l_2, l_1]$ и имеет длину $L = l_1 + l_2$

Несимметричное относительно полюса положение объема магнитной жидкости может определяться перепадом давления на его боковых границах как имеет место в магнитожидкостном уплотнении.

Магнитное поле аппроксимируется следующим образом: $H' = H / H_* = 1 / [1 + 3(z/l)^2]$, где H_* – характерное значение напряженности магнитного поля, соответствующее максимальному значению под полюсом при $z = 0$.

В дальнейшем будут использоваться безразмерные переменные, определяемые следующим образом: $z' = z / L$, $L = l_1 + l_2$, $\alpha = l_2 / l_1$, $\alpha_1 = l_1 / L = 1 / (1 + \alpha)$, $\alpha_2 = l_2 / L = \alpha / (1 + \alpha)$, $H' = H / H_*$, где Φ_0 есть начальная концентрация частиц.

Распределение концентрации частиц Φ в магнитной жидкости находится из решения уравнения диффузии частиц [1, 2].

В стационарной ситуации при непроницаемых границах объема жидкости, что соответствует поставленной задаче, вектор плотности потока массы \vec{i} обращается в ноль на границах и в каждой точке объема. Это означает, что при установлении равновесия магнитофоретический поток массы полностью компенсируется диффузионным.

Для вектора плотности потока массы \vec{i} будем использовать полученное в [1, 2] и соответствующее классическим представлениям теории броуновской диффузии ансамблей наночастиц выражение для жидкости с Ланжевеновским законом намагничивания

$$\vec{i} = -\rho D \nabla \Phi + \rho b \mu_0 m \Phi L(\xi) \nabla H \quad (1)$$

где: D – коэффициент диффузии частиц связанный с подвижностью b соотношением Эйнштейна $D = kTb$, $\mu_0 \approx 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума, m – магнитный момент отдельной частицы, $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана T – абсолютная температура, K , $L(\xi)$ – функция Ланжевена, $L(\xi) = ctg \xi - 1/\xi$, $\xi = \mu_0 m H / kT$.

Тогда, вытекающее из (1) при $\vec{i} = 0$ уравнение, определяющее распределение концентрации частиц в магнитной жидкости в одномерном случае $H' = H'(r')$ и $\Phi = \Phi(r')$, принимает следующий вид

$$\frac{d\Phi}{dz'} = U \Phi L(UH') \frac{dH'}{dz'}, \quad U = \mu_0 m H_* / kT. \quad (2)$$

Поставленная задача описывается безразмерным критерием U , представляющим собой отношение магнитной энергии частицы к ее тепловой энергии.

Это уравнение имеет общее решение следующего вида

$$\Phi = B \frac{sh[UH'(z')]}{H'(z')}.$$

Произвольная постоянная определяется из условия постоянства средней концентрации частиц во всем объеме жидкости:

$$\int_{-a_2}^{a_1} \Phi dz' = \Phi_0, \quad \text{из которого } B = \Phi_0 \left\{ \int_{-a_2}^{a_1} \frac{sh[UH'(z')]}{H'(z')} dz' \right\}^{-1}.$$

Данное решение дает распределение концентрации частиц в магнитной жидкости, зависящее от значения магнитного параметра U и конфигурации магнитного поля $H' = H'(r')$.

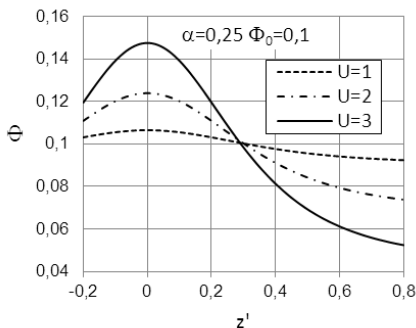


Рисунок 2. Распределение концентрации частиц в жидкости при $\alpha=0,25$ и разных значениях U

Типичное распределение концентрации частиц, полученное из приведенных выше формул, представлено на рисунке 2 при положении объема магнитной жидкости, соответствующего $\alpha=0,25$. Как видно из этого рисунка, максимальное значение концентрации наблюдается непосредственно под полюсом магнита в области наибольшей напряженности магнитного поля и тем больше, чем больше значение магнитного параметра U , а в силу несимметричного относительно полюса

положения магнитной жидкости значение концентрации частиц на его границах различны.

Магнитная сила, действующая на объем жидкости F_m , определяются в общем случае следующим выражением:

$$F_m = \mu_0 M_{sp} \pi (R_2^2 - R_1^2) \int_{-l}^l \Phi(z) L(\xi) \frac{dH}{dz} dz,$$

а при постоянной концентрации частиц Φ_0 равна:

$$F_{m0} = \mu_0 M_{sp} \pi (R_2^2 - R_1^2) \Phi_0 \int_{-l}^l L(\xi) dH,$$

где M_{sp} – намагниченность насыщения отдельной магнитной частицы, R_1, R_2 – радиусы цилиндров.

В безразмерном виде эти выражения запишутся следующим образом:

$$f_m = \frac{F_m}{\mu_0 M_{sp} \pi (R_2^2 - R_1^2) H_*} = \int_{\alpha_1}^{-\alpha_2} L[UH'(z')] \Phi(z') \frac{dH'}{dz'} dz',$$

$$f_{m0} = \frac{F_{m0}}{\mu_0 M_{sp} \pi (R_2^2 - R_1^2) H_*} = \Phi_0 \int_{\alpha_1}^{-\alpha_2} L[UH'(z')] dH'.$$

Эффект перераспределения концентрации частиц в магнитной жидкости будем характеризовать коэффициентом магнитной силы k_m , представляющим собой отношение магнитной силы, действующей на объем магнитной жидкости $f_m(\Phi)$, к ее значению при постоянной начальной концентрации магнитных частиц $f_m(\Phi_0)$:

$$k_m = f_m / f_{m0} = F_m / F_{m0}.$$

Влияние положения объема магнитной жидкости на магнитную силу и коэффициент магнитной силы при разных значениях магнитного параметра U показано на рисунках 3 и 4.

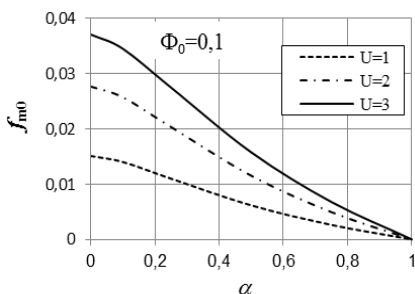


Рисунок 3. Зависимость магнитной силы от положения объема магнитной жидкости при разных значениях магнитного параметра U

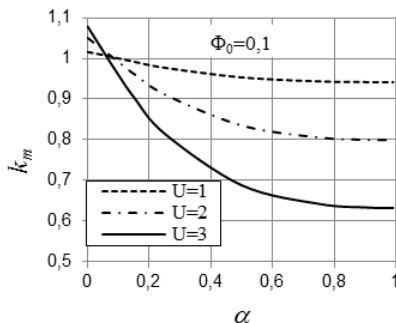


Рисунок 4. Зависимость коэффициента магнитной силы от положения объема магнитной жидкости при разных значениях магнитного параметра U

Как видно из этих рисунков, магнитная сила имеет наибольшее значение при таком крайнем положении объема магнитной жидкости, когда его левая граница находится строго под полюсом магнита, и спадает до нуля при его симметричном относительно полюса положении. При этом коэффициент магнитной силы превышает значение единица в небольшой области малых значений α , а затем уменьшается, стремясь к некоторому постоянному значению, тем меньшему, чем больше значение магнитного параметра U .

Таким образом, можно сделать вывод, что в рассмотренных условиях перераспределение концентрации частиц в магнитной жидкости приводит к увеличению предельного удерживаемого перепада давления при близком к

крайнему ($\alpha=0$) положению объема и уменьшает удерживаемый перепад давления в остальных случаях.

Данные решения справедливы только для таких значений параметра U , при которых значения концентрации, не превышают, величины, соответствующей фазовому переходу магнитной жидкости в концентрированную фазу [3, 4]. В противном случае это обстоятельство должно быть включено в рассмотрение.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь (ТМС20-015).

Литература

1. Bashtovoi, V.G. The effect of diffusion processes on the statics of magnetic fluids / V.G. Bashtovoi, V.K. Polevikov, A.M. Algadal // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. – 2006. – No 3. P. 42 – 48.

2. Bashtovoi, V.G. Influence of Brownian Diffusion on the Statics of Magnetic Fluid / V.G. Bashtovoi [and others]. – Magnetohydrodynamics. – 2007. – Vol.43, No 1. – P.3-11.

3. Баштовой, В.Г. Процессы диффузионного магнитофоретического массопереноса в нанодисперсных магнитных жидкостях с фазовыми переходами / В.Г. Баштовой, П.П. Кужир, А.Ю. Зубарев, В.С. Мороз // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук». – 2017. - № 2. – С. 78-87.

4. Bashtovoi, V. On the mechanics of magnetic fluids with field-induced phase transition: application to Couette flow / V.G. Bashtovoi, P.P. Kuzhir, A.Y. Zubarev, V.S. Moroz // Magnetohydrodynamics. – 2018. – V. 54, No 3. – P.181-197.